

学校编码: 10384

分类号____密级____

学号: X2011250031

UDC____

厦门大学

工程硕士学位论文

钢结构磁力耦合应力检测原理及应用技术研究

The Study of Theory and Application Technology of
Stress NDT&E Based on Magnetic-Mechanical Coupling
Effects For Steel Structure

杨鎏

指导教师: 张鹏程 副教授

专业名称: 建筑与土木工程

论文提交日期: 2016 年 5 月

论文答辩日期: 2016 年 5 月

学位授予日期: 2016 年 6 月

答辩委员会主席:

评阅人:

2016 年 5 月 15 日

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

摘要

钢结构构件作为铁磁体材料的代表,在工程中应用越来越广泛,若能找出铁磁体材料的磁特性与应力之间存在的联系,建立合理的本构模型并结合实验以及数值计算等手段,阐述其在实际应力检测中的指导和预测的作用,将对掌握工程中钢结构构件的实际受力情况具有重要的意义。本文从理论、技术、验证试验、程序分析的角度对所建立的磁力耦合本构模型及其应用进行了探讨和分析。主要得到了以下结论:

(1) 本构模型对材料磁力效应的描述方面:结合钢材料构件的磁学特性,通过对钢材料构件磁力耦合状况的分析和研究,指出了钢结构构件的内应力与其磁特征量间存在的对应关系,应力的变化可导致磁特性发生相应的改变,可根据收集到的反馈磁信号特征量值来确定构件的内应力。同时,说明了构件磁特性特征值较易捕捉和收集,数据处理具有一定的便利性,可在一定程度上作为工程应用中检测钢构件内应力的方法的补充,为本构关系的理论建模供了实验数据。

(2) 根据铁磁学的基础理论及应力耦合检测的原理基础,分析了磁性材料构件的内应力对铁磁晶体内的磁畴及磁畴壁结构及运动的影响;指明了构件的磁特性改变的微观原因,即构件的内应力会改变晶体内的磁畴结构,使磁畴壁发生移动和磁畴磁矩作用方向的改变,在内应力作用下晶体内的磁畴壁能和壁厚均发生改变。

(3) 建立了钢结构磁力耦合作用下的本构模型,研究了钢构件的内应力与磁特性的模型,通过对铁磁体杆件在不同应力状态下的磁特性变化规律的试验,找出了不同应力状态下拉压杆的磁滞回线变化规律,绘制出了在不同外磁场强度下磁导率-应力曲线,并确定出了使曲线所反映的对应关系最明显的外磁场强度。试验结果说明,磁性材料的钢构件的磁特征值与内应力的本构关系的分析与试验结果能够较好的吻合,本构关系的分析得到了较好的验证。

(4) 磁力耦合本构模型数值计算方面:通过计算机 ANSYS 程序模拟实际检测,得到了在单向拉力作用下 Q235 钢铁杆件的 H-B 数据表,将有限元计算值与磁力

耦合拉压试验数据进行对比,两组数据误差很小,说明有限元程序经过改良后在分析计算工作中的实用性,同时也验证了有限元计算中使用的本构模型的合理性。数值计算验证了钢构件内应力与其磁特征值磁导率间的耦合关系模型的正确性。

(5) 初步提出了构件磁化技术的工作步骤,确定了准确有效测量构件的磁性特征值对于实现磁力耦合应力检测的关键性与重要性。

关键词: 钢结构磁力; 本构模型; 应力; 耦合

Abstract

Steel structures as the representative of the ferromagnetic materials is widely used in engineering, test and engineering field, the magnetic coupling stress testing is very necessary. A Magnetic-Mechanical Coupling Constitutive model is presented to describe the relationship between magnetism and stress of the steel structures. In this article, theory, technology, program analysis, magnetic coupling stress of steel detection is discussed and analyzed. Mainly got the following conclusions:

(1) Consider the effect of magnetism of steel structures in constitutive model, combined with the magnetic properties of the steel members, analysis and research on the steel material component magnetic coupling condition, improved the detection of internal stress of steel members in engineering application problems in the application of the total. The results shows that the internal stress of steel structures and their corresponding relationship between magnetic characteristics, according to the feedback of collected magnetic signal characteristic value to determine the internal stress of components. At the same time, the characteristic value of the magnetic properties of components more easily capture and collection, data processing more convenient. And these experiment data would be used for the constitutive model building.

(2) According to the basic theory of the study of the stress of the ferromagnetic learn coupling detection principle foundation, analyzed the internal stress of magnetic material artifacts within the ferromagnetic crystal on magnetic domain and magnetic domain wall structure and motion; Pointed out that the internal stress of component will change the magnetic domain inside the crystal structure of the magnetic domain wall movement and magnetic domain the direction of magnetic moment change, under the effect of internal stress in the crystal of magnetic domain wall and wall thickness are changed, this is also causes of microscopic changes in the magnetic properties of components.

(3) A Magnetic-Mechanical Coupling Constitutive model is presented, and the internal stress of steel members is studied with the model of the magnetic properties, in view of the ferromagnetic compressive bar, analyses the magnetic characteristics of the steel members of magnetic material value and the constitutive relation of internal stress, it is the basic foundation of magnetic, stress coupling, and verified the model analysis.

(4) In the aspect on numerical computation of constitutive model, ANSYS program by computer is simulated actual detection, and obtained under unidirectional tension of Q235 steel bar H-B data table, the finite element calculation value compared with the laboratory data, the error is small, the two groups shows that the finite element program based on the analysis of calculation after improvement in the work of the practicability, but also to verify the internal stress of steel members used in the finite element calculation with magnetic coupling relationship between characteristic value of permeability model is correct. The validity of the relationship between internal stress and magnetic characteristic value of permeability is verified by numerical calculation.

(5) Steps of the technique of magnet magnetization components work, this paper expounds the constructing of frontal magnetic characteristic value ,the constitutive relation of internal stress and its importance.

Keywords: The Magnetic of Steel Structure; Constitutive Model; Stress; Coupling

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 磁性的概论	1
1.1.2 铁磁材料的简介	2
1.2 当前国内外磁力耦合问题研究历程	3
1.3 钢结构应力检测研究现状	4
1.3.1 有损应力的检测方法	4
1.3.2 无损应力的检测方法	5
1.4 钢结构磁力耦合应力检测原理及应用问题的提出及意义	7
1.5 主要研究内容	15
2 钢结构磁力耦合应力检测的基础理论	17
2.1 铁磁晶体内的相互作用能	17
2.1.1 交换作用能	17
2.1.2 外部磁场能	18
2.1.3 退磁场能	19
2.2 磁畴及磁畴壁的概念	20
2.3 应力对磁畴壁的影响	21
2.4 本章小结	25
3 钢结构磁力耦合本构模型及验证试验	26
3.1 磁效应应力检测法的可行性	26
3.1.1 磁致伸缩效应	26
3.1.2 磁致伸缩效应产生的机理	26
3.1.3 应力对磁化强度的影响	28
3.2 应力与磁导率之间的影响关系	32

3.2.1 应力与磁导率间的数学模型.....	32
3.2.2 磁力耦合应力检测法试验.....	35
3.2.3 磁导率分析计算及磁导率—应力对应关系曲线的建立.....	40
3.2.4 磁力耦合应力检测法 ANSYS 分析.....	47
3.3 本章小结.....	53
4 钢结构磁力耦合应力检测技术运用.....	55
4.1 钢结构构件检测技术简介.....	55
4.2 磁性应力检测中的信号处理技术.....	56
4.2.1 磁信号测量的基本要求.....	56
4.2.2 磁场测量原理及元件.....	56
4.2.3 磁性应力检测中的信号处理技术.....	58
4.3 磁力效应在应力检测中的应用.....	62
4.3.1 磁力效应应用于磁弹性测力传感器.....	62
4.3.2 磁力效应应用于钢结构表面缺陷的检测技术.....	63
4.4 本章小节.....	64
5 结论.....	65
5.1 本研究的结论.....	65
5.2 存在的问题和展望.....	66
参考文献.....	67
致谢.....	69

Contents

1 Preface.....	1
1.1 Introduction.....	1
1.1.1 Introduction of the magnetic.....	1
1.1.2 A brief introduction of ferromagnetic materials.....	2
1.2 The current domestic and foreign magnetic coupling problem studying process.....	3
1.3 Stress testing research status of steel structure.....	4
1.3.1 Detrimental to the detection method of stress.....	4
1.3.2 Nondestructive detection method of stress.....	5
1.4 The principle and application of steel structure of magnetic coupling stress testing put forward and the significance of the problem.....	7
1.5 The main research contents.....	15
2 The basic theory of steel structure of magnetic coupling stress testing.....	17
2.1 The interaction in the ferromagnetic crystal can.....	17
2.1.1 Exchange function can.....	17
2.1.2 External magnetic field can.....	18
2.1.3 Magnetic field can back.....	19
2.2 The concept of the magnetic domain and magnetic domain wall.....	20
2.3 The influence of stress on magnetic domain wall.....	21
2.4 The main research contents.....	25
3 Steel structure principle of magnetic coupling stress detection research.....	26
3.1 The feasibility of magnetic effect of stress test.....	26
3.1.1 Magnetostrictive effect.....	26

3.1.2 The mechanism of the magnetostrictive effect.....	26
3.1.3 The influence of mechanical stress on the magnetization.....	28
3.2 The influence of the relationship between stress and magnetic permeability.....	32
3.2.1 A mathematical model between stress and magnetic permeability.....	32
3.2.2 The magnetic coupling stress test experiment.....	35
3.2.3 Permeability analysis calculation and permeability stress the establishment of corresponding relation curve.....	40
3.2.4 The magnetic coupling ANSYS confirmatory analysis of the stress test	47
3.3 The main research contents.....	53
4 Steel structure of magnetic coupling stress testing technology.....	55
4.1 Steel structure component testing technology introduction.....	55
4.2 Magnetism stress testing in the signal processing technology.....	56
4.2.1 The basic requirement of magnetic signal measurement.....	56
4.2.2 Magnetic field measuring principle and components.....	56
4.2.3 Magnetism stress testing in the signal processing technology.....	58
4.3 Magnetic effect in the application of the stress tests.....	62
4.3.1 Magnetic effect is applied to the magnetic elastic strain sensors.....	62
4.3.2 Magnetic effect of application of steel structure of surface defect inspection technology.....	63
4.4 The main research contents.....	64
5 Conclusion.....	65
5.1 The conclusion of this study.....	65
5.2 The problems and prospects.....	66
References.....	67
Thanks.....	69

1 绪论

1.1 引言

1.1.1 磁性的概论

物质是由原子组成，原子是由原子核与核外的电子所构成，现代科学表明，原子核外电子是物质磁性的来源^[1,2]。磁性材料主要为金属材料的晶体结构物质，晶体内原子的原子磁矩由原子核外电子磁矩（“电子磁矩”）和原子核磁矩（“核磁矩”）两部分构成，与电子磁矩相比，原子核的核磁矩大小很小，常常可忽略不计，通常认为原子磁矩就等于原子核外电子磁矩。原子核外电子磁矩由“自旋磁矩”和“轨道磁矩”两部分组成，可认为原子磁矩就等于核外电子的自旋磁矩和轨道磁矩之和。

根据磁性材料的不同磁特性特征，可按磁性材料的磁学特性将磁性材料分为以下五种：

(1) 抗磁性：磁性材料在外部磁场作用下，材料中晶体的核外电子磁矩方向与外部磁场作用方向相反，磁性材料表现出抗磁性特性。

(2) 顺磁性：与抗磁性相相反，即磁性材料构件在外部磁场的作用下，磁性材料晶体的电子磁矩方向同外部磁场作用方向相同，磁性材料表现出顺磁性特性。

(3) 反铁磁性：磁性材料当在外部磁场作用下，材料晶体的邻近原子的电子磁矩大小相等，但作用方向刚好相反，磁矩会相互抵消，即局部区域总磁矩为零，从统计学上来说，整体磁矩也为零。

(4) 铁磁性：在磁化和磁场之间能够出现磁滞现象，这种关系不是线性关系，需要反复磁化才能产生。注：在微弱的磁场下，含有铁磁性的物质能够被磁所饱和。

(5) 亚铁磁性：指与铁磁性材料的磁学特性类似，但亚铁磁性材料的磁化率与铁磁性材料的磁化率相比会小一个数量级。铁氧体就是亚铁磁性材料的典型的代表物质。

在以上的磁特性介绍中,反铁磁性材料、顺磁性材料以及抗磁性材料均属于弱磁性材料,而铁磁性材料和亚铁磁性材料均属于强磁性材料。

1.1.2 铁磁材料的简介

作为强磁性材料的一种,铁磁性材料的显著的特征是存在畴结构还会自发性磁化现象^[3]。自发性磁化程度与温度高低密切相关,当温度大于居里点时,材料的原子就会混乱非规整排列^[4,5],这时自发磁化现象就会消失。材料的能量呈现各向异性,指的是材料能量排列方向和自发磁化是不相同的。在宏观上,铁磁材料被施加了磁场后出现了外部磁场方向各向异性。“磁致伸缩特性”是指在外部磁场作用下,铁磁性材料构件可能发生沿磁性材料构件的轴线方向的伸长或缩短的形变或构件的体积大小发生改变的现象。

铁磁材料种类丰富,依据材料的磁特性划分有:旋磁、软磁和永磁三种,由用途来划分材料的磁性有压磁和矩磁两类,具体如下:

(1) 软磁材料:该特性材料的矫顽力小但磁导率值往往很大,矫顽力通常不会大于 1000e(奥斯特,CGS 国际单位制),比如铁镍合金、锌镍铁氧体以及工业铁、铁镍锌氧体以及锰铁锌氧体等材料。

(2) 永磁材料:即硬磁材料,其矫顽力通常不小于 1000e,比如碳钢、钕铁氧体以及稀土永磁等。

(3) 矩磁材料:表现为矫顽力很小,磁滞回线呈矩形形状。记忆元件往往会采用这类材料来制作。比如锌铁锰氧体、铁锰氧体以及镍含量为 50%的合金等。

(4) 旋磁材料:其应用的领域为微波器件。当有微波电磁场作用时^[6],材料在工程使用上显著的特点是会有一些^[7]“特殊效应”,如法拉第旋转效应和铁磁共振效应。

(5) 压磁材料:当材料受到磁力压缩时会发生形变。根据这一特征,该类材料能够用来制作测量速度和力等物理量的传感器。

矫顽力也能够作为划分磁性材料的一个重要指标,矫顽力指的是在翻转磁场下,材料从被磁化状态发生磁化而反转成为所需磁场的强度。根据矫顽力的不同可将磁性材料分为三类即“记忆型磁材料”、“软磁材料”、“永磁材料”等。

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.